

УДК 621.791

Бузорина Д. С., Шалимов М. П.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

Шолохов М. А.

ООО «ШТОРМ», г. Екатеринбург

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЙ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ШВА

При реализации технологии многопроходной сварки плавящимся электродом зачастую сталкиваются с проблемой обеспечения требуемого качества сварных соединений, а именно с возникновением дефектов таких как несплавления между валиком и кромками разделки, а также между соседними валиками. Получение заданной глубины проплавления при удовлетворительном формировании сварного шва возможно за счет варьирования в допустимых пределах параметров режима сварки, определяющих тепловложение. Экспериментально установлены зависимости между параметрами сварки в проблемных участках разделки и параметрами, характеризующими качество сварного соединения. На их основе разработана методика расчета параметров режима многопроходной механизированной сварки в защитных газах, обеспечивающих получение сварных соединений с заданным проплавлением. Полученные аналитические зависимости могут быть в дальнейшем использованы как элементы программного обеспечения при создании адаптивных сварочных систем.

Ключевые слова: многопроходная сварка плавящимся электродом, полный тепловой КПД процесса сварки, коэффициент площадей, расчет параметров режима сварки.

Многопроходная дуговая сварка плавящимся электродом, благодаря своей универсальности и относительной простоте механизации и автоматизации процесса, является одним из широко применяемых способов сварки при производстве сварных конструкций, в том числе из проката толщиной более 10 мм. Несмотря на широкую распространенность способа, при реализации технологии многопроходной сварки плавящимся электродом зачастую сталкиваются с проблемой обеспечения требуемого качества

© Бузорина Д. С., Шалимов М. П., Шолохов М. А., 2015

сварных соединений, а именно, с возникновением таких дефектов, как несплавления между валиком и кромками разделки, между соседними валиками. Получение заданной глубины проплавления при удовлетворительном формировании сварного шва возможно за счет варьирования в допустимых пределах параметров режима сварки (ток, напряжение, скорость сварки), определяющих тепловложение [1].

Для разработки технологии многопроходной сварки необходимо наличие методик, позволяющих рассчитывать параметры режима, обеспечивающие заданную глубину проплавления при минимально необходимом тепловложении в изделие. На сегодняшний день нет методик расчета режимов многопроходной сварки, в полной мере учитывающих ее особенности и технологические параметры, оказывающие влияние на формирование сварного соединения.

Таким образом, изучение условий формирования шва и особенностей распределения теплоты при многопроходной сварке, а также разработка методики расчета режима сварки, учитывающей влияние геометрических и технологических параметров на формирование сварного соединения остаются актуальными.

Критерием качественного формирования сварного шва в настоящей работе принята максимальная эффективность процесса сварки при условии получения требуемой площади сечения сварного валика и заданного коэффициента площадей, характеризующего соотношение площадей проплавленного и наплавленного металлов.

На основании исследования влияния технологических параметров (угла разделки α , положения электрода в разделке x , скорости сварки $v_{св}$) на формирование сварного шва и физической модели процесса сварки плавящимся электродом в разделку, в работе [2] была предложена методика расчета параметров режима сварки в защитных газах.

Уравнения учитывают влияние каждого исследуемого фактора по отдельности, а также их совместное влияние, следовательно, отражают

совместное взаимное влияние параметров режима сварки и величины жидкой прослойки под дугой. Однако для обеспечения адекватности данных уравнений при изменении условий сварки, необходимо ввести поправочные коэффициенты от состава защитного газа и вылета электрода.

С учетом вышесказанного, общие уравнения для определения площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки можно представить в следующем виде:

$$F = F_v(\alpha, x, v_{св}) \cdot \theta_I^F(I_{св}) \cdot \theta_{\%}^F(\% \text{ CO}_2) \cdot \theta_l^F(l_э), \quad (1)$$

$$\eta_c = \eta_v(\alpha, x, v_{св}) \cdot \theta_I^\eta(I_{св}) \cdot \theta_{\%}^\eta(\% \text{ CO}_2) \cdot \theta_l^\eta(l_э), \quad (2)$$

где $F_v(\alpha, x, v_{св})$, $\eta_v(\alpha, x, v_{св})$ – функции зависимости площади сечения валика и полного теплового КПД соответственно от угла скоса кромок, α , положения электрода в разделке, x , скорости сварки $v_{св}$ [2]; $\theta_I^F(I_{св})$; $\theta_{\%}^F(\% \text{ CO}_2)$; $\theta_l^F(l_э)$ – функции зависимости площади сечения валика от сварочного тока ($I_{св}$), состава защитного газа (процентного содержания углекислого газа, $\% \text{ CO}_2$, в смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$) и вылета электрода ($l_э$) соответственно; $\theta_I^\eta(I_{св})$; $\theta_{\%}^\eta(\% \text{ CO}_2)$; $\theta_l^\eta(l_э)$ – функции зависимости полного теплового КПД процесса сварки от сварочного тока, $I_{св}$, состава защитного газа (процентного содержания углекислого газа CO_2 , в смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$) и вылета электрода ($l_э$) соответственно.

Для определения коэффициентов $\theta_I^F(I_{св})$; $\theta_{\%}^F(\% \text{ CO}_2)$; $\theta_l^F(l_э)$; $\theta_I^\eta(I_{св})$; $\theta_{\%}^\eta(\% \text{ CO}_2)$; $\theta_l^\eta(l_э)$ проведена серия экспериментов.

По полученным в ходе экспериментальных работ данным построены графики влияния вылета электрода на площадь сечения валика (рис. 1) и на полный тепловой КПД процесса сварки (рис. 2).

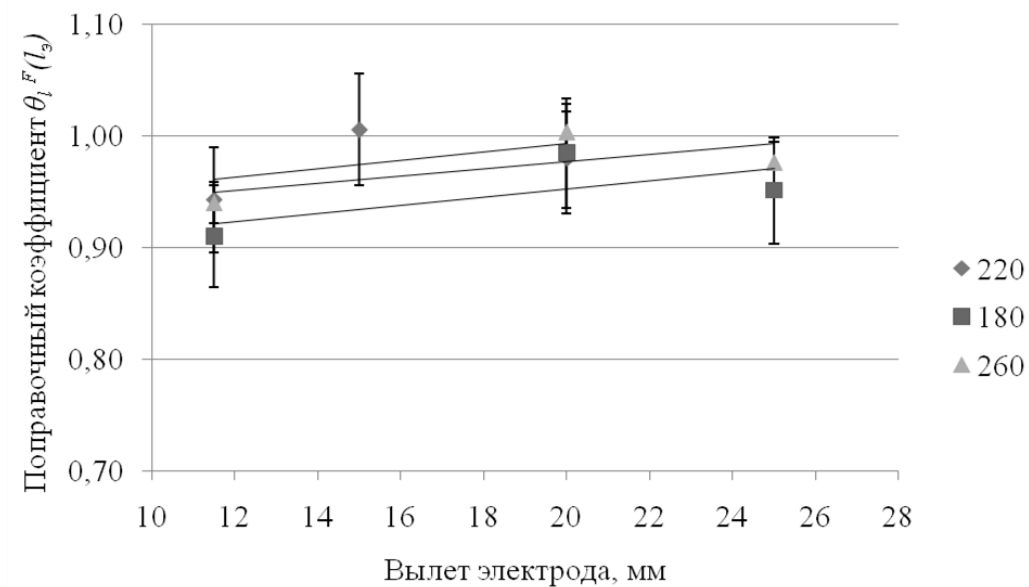


Рис. 1. Зависимость поправочного коэффициента $\theta_l^F(l_3)$ от вылета электрода

Графики, приведенные на рис. 1 и 2, показывают, что при рассмотренных значениях величины сварочного тока, характер изменения поправочного коэффициента для площади сечения валика и теплового КПД от вылета электрода – идентичный. Следовательно, при определении площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки можно принять допущение об отсутствии взаимного влияния вылета электрода и сварочного тока. После обработки результатов экспериментов, коэффициенты $\theta_l^F(l_3)$ и $\theta_l^\eta(l_3)$ получены в виде функций от вылета электрода, l_3 :

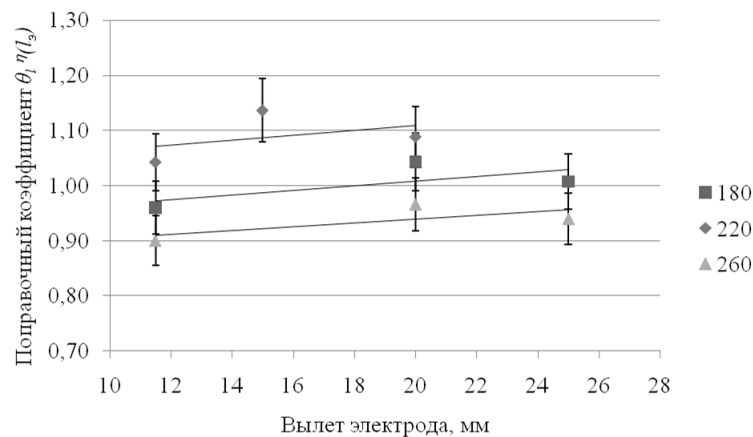


Рис. 2. Зависимость поправочного коэффициента $\theta_l^\eta(l_3)$ от вылета электрода

$$\theta_l^F(l_9) = 0,004 \cdot l_9 + 0,89; \quad (3)$$

$$\theta_l^\eta(l_9) = 0,002 \cdot l_9 + 0,95. \quad (4)$$

Результаты исследований влияния состава защитного газа показывают, что при увеличении доли CO_2 в смеси защитных газов (от 0 до 30 %) площадь сечения валика увеличивается. При одинаковом режиме сварки ($I_{\text{св}} = \text{const}$, $v_{\text{св}} = \text{const}$), обеспечивающем одинаковое количество наплавленного металла, увеличение площади сечения валика объясняется увеличением площади проплавления, что согласуется и известными литературными данными [3; 4].

Зависимости площади сечения валика и теплового КПД от процентного содержания CO_2 после обработки результатов экспериментов получены в следующем виде:

$$\theta_{\%}^F(\% \text{CO}_2) = 0,003 \cdot \% \text{CO}_2 + 0,92; \quad (5)$$

$$\theta_{\%}^\eta(\% \text{CO}_2) = 0,006 \cdot \% \text{CO}_2 + 0,83. \quad (6)$$

Тогда общие уравнения зависимости теплового КПД процесса сварки и площади сечения валика примут вид:

$$F = (47,50 - 0,031 \cdot \alpha + 4,21 \cdot x - 0,96 \cdot v_{\text{св}} - 0,11 \cdot \alpha \cdot x + 0,003 \cdot \alpha \cdot v_{\text{св}} - 0,14 \cdot x \cdot v_{\text{св}} + 0,004 \cdot \alpha \cdot x \cdot v_{\text{св}}) \cdot (0,013 \cdot I_{\text{св}} - 1,56) \cdot (0,004 \cdot l_9 + 0,89) \cdot (0,003 \cdot \% \text{CO}_2 + 0,92) \quad (7)$$

$$\eta_c = (0,125 - 0,006 \cdot \alpha + 0,018 \cdot x - 0,024 \cdot v_{\text{св}} + 0,00006 \cdot \alpha^2 + 0,0006 \cdot x^2 - 0,0005 \cdot v_{\text{св}}^2 - 0,0005 \cdot \alpha \cdot x + 0,00012 \cdot \alpha \cdot v_{\text{св}} - 0,00013 \cdot x \cdot v_{\text{св}}) \cdot (0,005 \cdot I_{\text{св}} + 0,08) \cdot (0,002 \cdot l_9 + 0,95) \times (0,006 \cdot \% \text{CO}_2 + 0,83) \quad (8)$$

Учитывая зависимости, ранее предложенные авторами в работе [2] и зависимости (3)–(8), уравнения для определения параметров режима сварки, могут быть представлены в следующем виде:

1. **Диаметр электрода** выбирается в зависимости от типа соединения и толщины свариваемого металла (или катета шва).

2. **Сварочный ток:**

$$I_{\text{св}} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}, \text{ А.} \quad (9)$$

Коэффициенты a , b , c определяются по формулам:

$$a = -0,015 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{F_H},$$

$$b = 0,64 + 0,06 \cdot x + \frac{\pi \cdot d^2}{F_H} \cdot (3,34 + 0,35 \cdot x - 0,01 \cdot \alpha),$$

$$a = -74,05 + 0,05 \cdot \alpha - 6,56 \cdot x - \frac{\pi \cdot d^2}{F_H} \cdot (185,97 - 0,6 \cdot \alpha \cdot x - 0,58 \cdot \alpha + 27,81 \cdot x) -$$

$$- \frac{(1+k) \cdot F_H}{(0,004 \cdot l_3 + 0,89) \cdot (0,003 \cdot \% CO_2 + 0,92)}$$

где d_3 – диаметр электрода, мм;

α – угол скоса кромок, град;

F_H – площадь наплавленного металла, мм²;

k – коэффициент площадей (при сварке плавящимся электродом при применяемых на практике режимах $k = 0,18–4,0$) [1].

3. Скорость сварки:

$$v_{св} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot (0,078 \cdot I_{св} - 8,32) \cdot 60}{4 \cdot F_H}, \text{ м/ч.} \quad (10)$$

где d_3 – диаметр электрода, мм;

$I_{св}$ – сварочный ток, А;

F_H – площадь наплавленного металла, мм².

5. Напряжение:

$$U_{эф} = \frac{B_{эф} \cdot v_{nn}}{\eta_c \cdot I_{св}}, \text{ В,} \quad (11)$$

Значение коэффициента $B_{эф}$ определяется по формуле:

$$B_{эф} = \gamma_m \cdot H_{пл} \cdot \frac{(1+k)}{4} \cdot \pi \cdot d^2. \quad (12)$$

где γ_m – удельная плотность металла, кг/м³;

$H_{пл}$ – энтальпия при температуре плавления с учетом скрытой теплоты плавления, Дж/кг [1];

k – коэффициент площадей;

d_3 – диаметр электрода, мм;

Значение теплового КПД процесса сварки по формуле (8).

Полученные параметры режима сварки должны удовлетворять граничным условиям. В общем виде граничные условия параметров сварки для получения качественного формирования шва могут быть записаны в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{св}, U_{д} \in \text{области оптимальны х параметров} \\ U_{св} \rightarrow U_{эф} \\ q_{ног} \leq q_{ног}^{дон} \text{ (ограничение погонной энергии, если требован я} \\ \text{по ограничению предусмотрены нормативно й документацией)} \\ v_{св}^{факт.} \geq v_{св}^{задан} \text{ (верхняя граница скорости сварки, исходя из ограничени я} \\ \text{погонной энергии)} \\ v_{св} \geq v_{св \min} \text{ (нижняя граница скорости сварки, исходя из условия уменьшения} \\ \text{количества проходов)} \end{array} \right.$$

Разработанная методика расчета параметров режима многопроходной сварки с заданными площадью сечения валика и долями участия наплавленного и основного металла шва (коэффициент площадей k) обеспечивает достаточную для практических целей точность и может применяться при разработке технологии сварки углеродистой низколегированной стали толщиной от 10 до 50 мм в смесях защитных газов на основе аргона ($Ar + 0\text{--}30\ \% CO_2$). Кроме того, полученные аналитические зависимости могут быть в дальнейшем использованы для создания автоматических и роботизированных установок для сварки, что является одной из актуальнейших задач современного сварочного производства, а именно, создание алгоритмов управления, назначение и корректировка параметров режима сварки.

Литература

1. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности. М.: Машиностроение, 1973. 448 с.
2. Шолохов М. А., Бузорина Д. С. Расчет параметров режима наплавки

пристеночного валика при многопроходной сварке в защитных газах // Автоматическая сварка. 2013. № 7. С. 63–67.

3. Потапьевский А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. М.: Машиностроение. 1974. 240 с.

4. Krahл A. Auswirkung zunehmender Kohlendioxidgehalte in Argon-Kohlendioxid-Schutzgasgemischen beim Metallschutzgasschweißen von Baustählen // Schweißen und Schneiden. 1971. № 5. P. 271–282.